

精品课程配套教材

21世纪应用型人才培养“十三五”规划教材

“双创”型人才培养优秀教材

数控加工工艺与编程

SHUKONG JIAGONG GONGYI YU BIANCHENG

主编 田学军 王 磊 陈 蕊



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

套教材

型人才培养“十三五”规划教材

人才培养优秀教材

数控加工工艺与编程

SHUKONG JIAGONG GONGYI YU BIANCHENG

主 编 田学军 王 磊 陈 蕊

副主编 莫德云 李 珊 王德文 王 称

李文杰 黄仕欣 王复阳 李文萱

常州大学图书馆
藏书章



哈尔滨工业大学出版社

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书是根据应用型院校的教学特点,结合编者多年的教学实践经验编写而成。

全书共分成六章:第一章数控加工工艺基础、第二章工件在数控机床上的装夹、第三章数控加工编程基础、第四章数控车削加工工艺、第五章数控铣削加工工艺与编程、第六章加工中心加工工艺与编程。前三章介绍了零件数控加工工艺的特点、内容和要点,帮助学生学会根据零件加工要求设计数控加工工艺及编写相关工艺文件。后三章结合不同加工设备工艺范围和加工内容,阐述零件的加工工艺方案设计,包括从典型零件的工艺分析和程序编制到复杂综合零件的实践应用,使学生熟悉数控机床应用和掌握常见零件的数控加工工艺分析和编程。

本书可作为机械设计制造及其自动化、机械电子工程、材料成形及控制工程以及机电类的专业教材,也可作为从事数控加工技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工工艺与编程 / 田学军, 王磊, 陈蕊主编. — 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5603-7870-1

I. ①数… II. ①田… ②王… ③陈… III. ①数控机床 - 加工 ②数控机床 - 程序设计 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 302931 号

责任编辑 李长波

封面设计 唐韵设计

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 北京俊林印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.25 字数 456 千字

版 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-7870-1

定 价 45.00 元

(如因印装质量问题影响阅读, 我社负责调换)

前 言

“中国制造 2025”对数控技术人才提出了新的要求。随着教育部高等教育“卓越工程师计划”等项目的实施以及各地高校“新工科”研究实践活动的开展，应用型教育对工程实践能力的培养日益受到重视。作为机械类专业的专业课程，数控加工工艺与编程课程的教学理念、教学内容、教学方法和手段也在不断调整。该课程的学习对学生日后的工作、学习将会产生深远影响。

本书是根据应用型院校的教学特点，结合编者多年的教学实践经验编写而成。本书内容体系符合应用型的教学规律，既有系统的理论，又有相关的实践。书中将数控机床必备的数控加工工艺规程的制订与数控编程有机地联系在一起，所选实例具有较强的实用性和代表性。

全书共分六章：第 1 章数控加工工艺基础，第 2 章工件在数控机床上的装夹，第 3 章数控加工编程基础，第 4 章数控车削加工工艺，第 5 章数控铣削加工工艺与编程，第 6 章加工中心加工工艺与编程。前三章介绍了零件数控加工工艺的特点、内容和要点，使学生学会根据零件加工要求设计数控加工工艺及编写相关工艺文件。后三章结合不同加工设备工艺范围和加工内容，阐述零件的加工工艺方案设计。从典型零件的工艺分析和程序编制到复杂综合零件的实践应用，使学生熟悉数控机床应用和掌握常见零件的数控加工工艺分析与编程。

本书可作为机械设计制造及其自动化、机械电子工程、材料成型及控制工程以及机电类的专业教材，也可作为从事数控加工技术人员的参考书。

本书共 6 章，由田学军、王磊、陈蕊担任主编，莫德云、李珊、王德文、王称、李文杰、黄仕欣、王复阳和李文萱担任副主编，具体编写分工如下：第 1 章和第 2 章由田学军、莫德云、王称和李文杰编写；第 3 章由田学军和王德文编写；第 4 章由田学军、王磊、陈蕊和李文杰编写；第 5 章和第 6 章由田学军、李珊、李文杰、黄仕欣、王复阳和李文萱编写；全书由田学军校核。

本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、资料与文献，谨致谢意！

由于编者水平、经验有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者给予批评指正。

编 者
2018 年 6 月

目 录

第 1 章 数控加工工艺基础	(1)
1.1 数控加工工艺的特点	(1)
1.2 机械加工精度	(3)
1.3 机械加工表面质量	(5)
1.4 数控加工工艺分析	(9)
1.5 刀具路线设计	(26)
1.6 数控加工工艺文件的编写与归档	(34)
第 2 章 工件在数控机床上的装夹	(42)
2.1 工件的定位	(42)
2.2 定位基准的选择原则	(45)
2.3 定位误差的概念与计算	(52)
2.4 工件的装夹	(56)
2.5 机床夹具概述	(59)
2.6 数控机床夹具	(62)
第 3 章 数控加工编程基础	(74)
3.1 数控编程概述	(74)
3.2 数控机床坐标系	(84)
3.3 FANUC 数控系统常用 G 指令使用介绍	(90)
3.4 子程序及应用	(96)
第 4 章 数控车削加工工艺	(102)
4.1 数控车床简介	(102)
4.2 数控车床加工的特点	(103)
4.3 数控车床机夹刀具的选择	(105)
4.4 数控车床典型夹具	(110)
4.5 数控车削加工工艺的制订	(113)
4.6 数控车床坐标系	(124)
4.7 数控车床的对刀方法	(126)
4.8 数控车床编程常用指令介绍	(130)
4.9 典型零件的数控车削加工实例	(144)



第5章 数控铣削加工工艺与编程	(155)
5.1 数控铣削加工基础	(155)
5.2 FANUC 系统数控铣削常用指令	(176)
5.3 平面铣削工艺及编程	(182)
5.4 轮廓铣削工艺及编程	(190)
5.5 槽铣削工艺及编程	(200)
5.6 型腔铣削工艺及编程	(204)
5.7 典型零件数控铣削加工工艺设计与编程	(211)
第6章 加工中心加工工艺与编程	(220)
6.1 加工中心加工基础与自动换刀	(220)
6.2 孔加工工艺与编程	(247)
6.3 MASTERCAM 自动编程概述	(269)
6.4 MASTERCAM X9 2D 铣削自动编程	(274)
6.5 典型零件的加工工艺	(291)
参考文献	(301)

数控加工工艺基础

1.1 数控加工工艺的特点

1.1.1 数控机床加工的特点

1. 加工的一致性好、加工质量稳定

数控机床是按数字形式给出的指令进行加工的，一般情况下工作过程不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造数控机床时，采取了许多措施，使得数控机床的定位精度和重复定位精度都很高，较容易保证一批零件尺寸的一致性，只要工艺设计和程序正确合理，加之精心操作，就可以生产出合格率高、加工质量稳定的零件。

2. 生产效率高

数控机床加工能在一次装夹中实现多道工序的连续加工；数控机床的主轴转速、进给速度范围大且为无级变速，定位速度快，通过合理选择切削参数，充分发挥刀具的加工性能，减少切削时间，不仅能保证高精度，而且加工过程稳定；一般只做首件检验和工序间关键尺寸的抽样检验，不需要在加工过程中进行中间测量，就能连续完成整个加工过程，减少了辅助动作时间和停机时间；更换数控机床被加工零件时几乎不需要重新调整机床，节省了零件安装调整时间。因此，数控机床的生产效率高。

3. 自动化程度高、减轻劳动强度

数控加工过程是按输入的程序自动完成的，操作者除了装卸零件、操作键盘、观察机床运行外，其他机床动作都是按加工程序要求自动连续进行切削加工的，不需要进行繁重的重复手工操作，因此减轻了工人的劳动强度。

4. 适合复杂零件的加工

普通机床难以实现或无法实现轨迹为三次以上的曲线或曲面的加工，如螺旋桨、汽轮机叶片之类的空间曲面；而数控机床则可实现几乎是任意轨迹的运动和加工任何形状的空间曲面，适合于复杂异形零件的加工。

5. 柔性好

所谓的柔性即适应性，是指数控机床随生产对象变化而变化的适应能力。在数控机床上改变加工零件时，只需重新编制程序，输入新的程序后就能实现对新的零件的加工；而不需改变机械部分和控制部分的硬件，且生产过程是自动完成的。这就为复杂型面的零件

单件加工、小批量生产以及试制新产品提供了极大的方便。适应性强是数控机床最突出的优点，也是数控机床得以出现和迅速发展的主要原因。

6. 单位工时加工成本高

数控机床价格昂贵，加工时分摊到每个零件上的设备折旧费较高；养护与维修费用较高；数控机床运行费用高；同时因为数控设备操作人员和管理者要有较高的素质，因此需要较高的人力资源费用，因此数控加工单位工时成本高。

7. 维护维修难度大

数控机床是技术密集型的机电一体化的典型产品，控制系统比较复杂，技术含量高，一些元器件、部件精密度较高。数控机床的维修难度大，需要维修人员既懂机械，又要懂微电子维修方面的知识，同时还要配备较好的维修装备。为获得良好的经济效益，数控机床通常采用高转速、大进给量连续加工，为保证机床正常运行和获得高精度的零件产品，需要操作人员精心维护。

1.1.2 数控加工工艺特点

由于数控加工是利用程序进行加工的，因此，数控加工工艺就必须有利于数控程序的编写并体现数控加工的特点，一般数控加工工艺具有如下特点。

1. 数控加工工艺远比普通加工工艺复杂

数控加工工艺要考虑加工零件的工艺性，加工零件的定位基准和装夹方式，还要选择刀具制订工艺路线、切削方法及工艺参数等，而这些在常规工艺中均可以简化处理。因此，数控加工工艺比普通加工工艺要复杂得多，影响因素也多，因而有必要对数控编程的全过程进行综合分析、合理安排，然后整体完善。相同的数控加工任务，可以有多个数控工艺方案，既可以选择以加工部位作为主线安排工艺，也可以选择以加工刀具作为主线来安排工艺。数控加工工艺的多样化是数控加工工艺的一个特色，是与传统加工工艺的显著区别。

2. 数控加工工艺设计要有严密的条理性

由于数控加工的自动化程度较高，相对而言，数控加工的自适应能力就较差，而且数控加工的影响因素较多，比较复杂，需要对数控加工的全过程深思熟虑，数控工艺设计必须具有很好的条理性。也就是说，数控加工工艺的设计过程必须周密、严谨，没有错误。

3. 数控加工工艺的继承性较好

凡经过调试、校验和试切削过程验证的，并在数控加工实践中证明是好的数控加工工艺，都可以作为模板，供后续加工相类似零件时调用，这样不仅节约时间，而且可以保证质量。作为模板本身在调用中也是一个不断修改完善的过程，可以达到逐步标准化、系列化的效果。因此，数控工艺具有非常好的继承性。

4. 数控加工工艺具有复合性

采用数控加工后，工件在一次装夹下能完成镗、铣、钻、铰、攻螺纹等多种加工，而这些加工在传统工艺方法下需分多道工序才能完成。因此，数控加工工艺具有复合性的特点，传统加工工艺下的一道工序在数控加工工艺中已转变为1个或几个工步，也可以说数控加工工艺的工序把传统工艺中的工序“集成”了，这使得零件加工所需的专用夹具数量

大为减少，零件装夹次数及周转时间也大大减少了，从而使零件的加工精度和生产效率有了较大的提高。

5. 需计量的尺寸和精度要求增多

在传统加工工艺下，工件的许多位置尺寸精度是靠专用夹具、钻模等保证的，而夹具和钻模是通过定期检测来反复确认它们是否能满足工艺要求的，因此，加工过程中，工件的这些位置尺寸和精度是不需计量检测的。但在数控加工工艺中，绝大多数位置尺寸和精度要求都是靠机床的功能和定位精度来保证的，需通过检测计量来确认，以决定加工程序乃至工艺方案的修改。所以，数控加工工艺规程中增加了较多需计量、检测的尺寸和形位公差。

6. 采用多坐标联动自动控制加工复杂表面

对于一般简单表面的加工方法，数控加工与普通机床加工无太大的差别。但是对于一些复杂表面、特殊表面或有特殊要求的表面，数控加工与普通机床加工有着根本不同的加工方法。例如对于曲线和曲面的加工，普通加工是用划线、样板、靠模、钳工、成形加工等方法进行，不仅生产效率低，而且还难以保证加工质量，而数控加工则采用多坐标联动自动控制加工的方法，其加工质量和生产效率是普通机床加工方法无法比拟的。

7. 数控加工工艺必须经过实际验证才能指导生产

由于数控加工的自动化程度高，安全和质量是至关重要的。数控加工工艺必须经过验证后才能用于指导生产。在普通机械加工中，工艺员编写的工艺文件可以直接下到生产线用于指导生产，一般不需要上述的复杂过程。

1.2 机械加工精度

1.2.1 机械加工精度的含义

机械加工精度是指零件加工完成后的实际几何参数（尺寸、几何形状和相互位置）与理想几何参数相符合的程度。理想的几何参数，对尺寸而言，就是平均尺寸；对表面几何形状而言，就是绝对的圆、圆柱、平面、锥面和直线等；对表面之间的相互位置而言，就是绝对的平行、垂直、同轴、对称等。

零件加工完成后的实际几何参数与理想几何参数的偏离程度称为加工误差。加工误差的大小反映了加工精度的高低。加工精度与加工误差都是评价加工表面几何参数的术语。加工精度的高低用公差等级衡量，等级值越小，其精度越高；加工误差用数值表示，数值越大，其误差越大。

加工精度主要包括尺寸精度、形状精度和位置精度。

1. 尺寸精度

尺寸精度是指加工表面本身尺寸（如圆柱面的直径）和表面间尺寸（如孔间距等）的精确程度，如长度、宽度、高度及直径等。尺寸精度的高低用尺寸公差的大小来表示。国家标准（GB/T 1800.4—1999）中规定，尺寸公差分20个等级，即IT01、IT0、IT1、

IT2、…、IT18。IT后面的数字代表公差等级，数字越大，公差值越大，公差等级越低，尺寸精度越低。

2. 形状精度

形状精度是指加工完成后的零件表面的实际几何形状与理想的几何形状相符合的程度，如圆度、圆柱度、平面度及锥度等。

3. 位置精度

位置精度是指加工完成后，零件有关表面之间的实际位置与理想位置相符合的程度，如平行度、垂直度及同轴度等。

国家标准《形状和位置公差通则、定义、符号和图纸表示法》（GB/T 1182—1996）中规定，形状和位置公差共有 14 个项目，各项的名称及符号见表 1-1。

表 1-1 形状和位置公差名称和符号

分类	特征项目	符号	分类	特征项目	符号	
形状公差	直线度	—	位置公差	定向	平行度	//
	平面度	▱			垂直度	⊥
	圆度	○			倾斜度	∠
	圆柱度	⊘		定位	同轴度	◎
	线轮廓度	⌒			对称度	≡
	面轮廓度	∩			位置度	⊕
			跳动	圆跳动	↗	
				全跳动	↗↘	

1.2.2 影响加工精度的因素及提高精度的措施

在机械加工中，由机床、夹具、工件和刀具组成的统一体，称为工艺系统，其产生的误差有两个组成部分。一部分是静态误差（称为系统误差），是指工艺系统各种原始误差的存在使刀具和工件之间的相对位置关系发生偏移而产生加工误差。这些与工艺系统本身的初始状态有关，例如，机床、夹具、刀具的制造误差，工件因定位和夹紧而产生的装夹误差，采用近似成形方法加工而产生的加工原理误差等。另一部分是动态误差（称为随机误差），与切削过程有关，例如，在加工过程中产生的切削力、切削热和摩擦，它们将引起工艺系统的受力变形、受热变形和磨损，使刀具或工件偏离正确的位置。

提高和保证加工精度的方法，大致可概括为以下几种：直接减少误差法、误差补偿法、误差转移法、均分误差法、均化误差法、就地加工法等。

1. 直接减少误差法

直接减少误差法在生产中应用较广。它是指在查明产生加工误差的主要因素之后，设法消除或减少这些因素。例如，细长轴的车削，由于受热和力的影响而使工件产生弯曲变形，现在采用了大走刀反向车削法，基本消除了轴向切削力引起的弯曲变形。再辅之以弹簧后顶尖，则可进一步消除热变形引起的热伸长的影响。

2. 误差补偿法

误差补偿法是指人为地制造出一种新的误差，去抵消原来工艺系统中的原始误差。当原始误差是负值时，人为的误差就取正值，反之则取负值，并尽量使两者数量大小相等；或者利用一种原始误差去抵消另一种原始误差，也是尽量使两者大小相等、方向相反，从而达到减少加工误差、提高加工精度的目的。

3. 误差转移法

误差转移法实质上是将工艺系统的几何误差、受力变形和热变形等，转移到不影响加工精度的方向上去。例如，当机床精度达不到零件加工要求时，常常不是一味地提高机床精度，而是从工艺上或夹具上想办法，创造条件使机床的几何误差转移到不影响加工精度的方面。例如，磨削主轴锥孔时，保证主轴和轴颈的同轴度，不是靠机床主轴的回转精度来保证，而是靠夹具保证的。当机床主轴与工件之间用浮动连接以后，机床主轴的原始误差就被转移掉了。

4. 均分误差法

加工中，由于毛坯或上道工序加工的半成品精度太低，或者由于工件材料性能改变，或上道工序的工艺改变（如毛坯精化后，把原来的切削加工工序取消），引起定位误差和误差复映过大，因而不能保证加工精度，这时可采用均分误差法。这种办法的实质就是把原始误差按其大小均分为 n 组。例如，可把毛坯（或上道工序的工件）按尺寸误差大小分为 n 组，每组毛坯的误差范围就缩小为原来的 $1/n$ ，然后按各组分别调整刀具与工件的相对位置或调整定位元件进行加工，就可大大缩小整批工件的尺寸分散范围。

5. 均化误差法

误差不断减少的过程就是误差均化法。它的实质就是利用有密切联系的表面相互比较、相互检查，从对比中找出差异，然后进行相互修正或互为基准加工，使工件被加工表面的误差不断缩小和均化。在生产中，许多精密基准件（如平板、直尺、角度规、端齿分度盘等）都是利用误差均化法加工出来的。

6. 就地加工法

在加工和装配中有些精度问题牵涉零件或部件间的相互关系，如果一味地提高零部件本身精度，不仅困难，有时甚至不可能。此时宜采用就地加工法（也称自身加工修配法），可方便地解决看起来非常困难的精度问题。

1.3 机械加工表面质量

1.3.1 机械加工表面质量的含义

机械加工表面质量是指零件在机械加工后表面层的微观几何形状误差和物理、化学及力学性能。主要零件的表面质量直接影响机械产品的工作性能、可靠性和寿命。

任何机械加工方法所获得的加工表面都不可能是绝对理想的表面，总存在着表面粗糙度、表面波纹度等微观几何形状误差。表面层的材料在加工时还会发生物理、力学性能变

化,甚至在某些情况下发生化学性质的变化。机械加工的表面质量有以下两方面的含义。

1. 表面的几何特性

加工表面的几何形状,总是以“峰”“谷”交替的形式出现的,其偏差又有宏观、微观的差别。

(1) 表面粗糙度。它是指加工表面的微观几何形状误差,主要取决于切削残留面积的高度,并与表面塑性变形、振动和积屑瘤的产生有关。车削和刨削时残留面积的高度如图 1-1 所示。表面粗糙度一般用 Ra 表示, Ra 值越大,粗糙度越差。

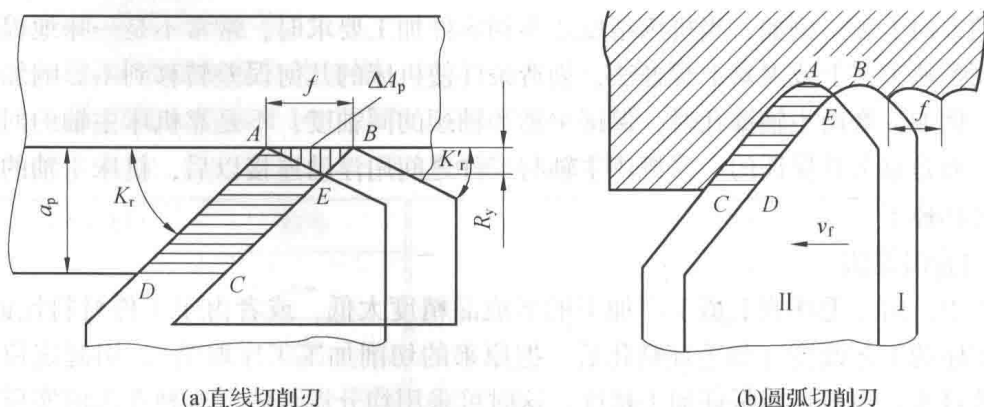


图 1-1 车削和刨削时残留面积的高度

(2) 表面波纹度。它是介于微观几何形状误差与宏观几何形状误差之间的周期性几何形状误差,由工艺系统的低频振动引起。

(3) 表面纹理方向。它是指表面刀纹的方向,取决于该表面所采用的机械加工方法及其主运动和进给运动的关系。一般对运动副或密封件有纹理方向的要求。

(4) 伤痕。伤痕是指在加工表面的一些个别位置上出现的缺陷。它们大多是随机分布的,如砂眼、气孔、裂痕和划痕等。

2. 表面层物理、力学性能

由于机械加工中切削力和切削热的综合作用,加工表面层金属的物理、力学和化学性能发生一定的变化,主要表现在以下三方面:

(1) 加工表面的冷作硬化。它是指工件经过机械加工后表面层的强度、硬度有提高的现象,也称为表面层的强化。

(2) 表面层金相组织变化。机械加工(特别是磨削)中的高温使工件表层金属的金相组织发生了变化,大大降低了零件的使用性能。

(3) 表面层产生残余应力或造成原有残余应力的变化。

1.3.2 影响表面粗糙度的因素及改进措施

1. 提高表面粗糙度的工艺措施

机械加工中,导致表面粗糙的主要原因有两个方面:一是指刀具相对于工件做进给运动时刀尖在工件表面上留下的残余面积;二是指切削过程中的塑性变形、摩擦、积屑瘤、鳞刺和振动等。降低表面粗糙度值的措施如下。

(1) 合理选择切削用量。

在切削用量三要素中，切削速度和进给量对表面粗糙度影响较大，背吃刀量对粗糙度没有显著影响。

切削速度是影响表面粗糙度的重要因素。在一定切削条件下，采用中等切削速度加工45钢，由于积屑瘤的影响，表面粗糙度较大。如果采用低速或高速来加工，可以避免积屑瘤和鳞刺的产生，从而获得较为光洁的表面。通常精加工总是采用高速或低速的切削速度，但应注意切削速度太高可能引起振动。

降低进给量可以降低残余面积的高度，减小加工表面的表面粗糙度。但进给量不宜太小以免切削厚度太小时，刀具无法切下很薄的切屑而使刀具与加工表面间产生严重挤压，以致加剧刀具磨损和加工表面的冷作硬化程度。

一般切削深度对表面粗糙度的影响不明显。但当其小到一定数值以下时，由于刀刃不可刃磨得绝对尖锐而具有一定的刃口半径，正常的切削就不能维持，常出现挤压、打滑和周期性地切入加工表面，从而使表面粗糙度增大。为降低加工表面粗糙度，应根据刀具刃口刃磨的锋利情况选取相应的切削深度。

(2) 选择适当的刀具材料和几何参数。

根据所加工的材料性质选择合适的刀具材料。从刀具的几何角度考虑，应增大前角和后角，使切削刃锋利，减少切屑的变形和前、后面间的摩擦，抑制积屑瘤和鳞刺的产生。但后角也不宜过大，过大的后角可能导致振动。减小主偏角和副偏角，增大刀尖圆弧半径，可使残余面积高度降低从而减小表面粗糙度，但当工艺系统刚性不足时，容易引起振动，反而会恶化加工表面质量。

(3) 改善材料的切削加工性能。

采用热处理正火或退火工艺，细化晶粒，可获得表面粗糙度值很小的表面。

(4) 加注切削液。

在低速精加工中，合理地选择与使用切削液可显著减小表面粗糙度。首先，切削液有冷却润滑作用；其次，加工中使用切削液可降低切削温度，减少摩擦，抑制或消除积屑瘤的产生；最后，切削液还能起冲洗与排屑的作用，保证已加工表面不被切屑挤压划伤。

2. 提高表面物理力学性能的措施

加工过程中工件由于受到切削力、切削热的作用，工件的表面层金属的物理力学性能将发生很大的变化。

(1) 影响表面层金属冷作硬化的因素及改善措施。

切削加工过程中，在表面层产生的塑性变形使晶体间产生剪切滑移，晶格严重扭曲，致使晶粒拉长、破碎和纤维化，从而引起材料的强化，导致表面层的硬度提高，这就是冷作硬化。表面层冷作硬化的程度取决于产生塑性变形的力、速度，以及变形时的温度。因此，加工时影响冷作硬化的因素主要有刀具的几何参数、切削用量和材料性能等。改善措施如下：

① 选择合适的刀具几何参数。

刀具几何参数的影响主要是刃口圆弧半径和前、后角。当刃口圆弧半径偏大、前角为

负值、后角偏小时，导致工件表面层的挤压增大，且后面的磨损量增大，冷硬层的深度和硬度也随之增大。欲使冷作硬化减小，刀具刃口半径和前、后角必须改善。

② 选择合理的切削用量。

首先，选用较大的切削速度。当切削速度增大时，硬化层的深度和硬度都将减小，一方面切削速度增大会使切削温度升高，有助于冷作硬化的回复；而另一方面由于切削速度增大，刀具与工件的接触时间变短，塑性变形程度减小。其次，选用合理的进给量。当进给量增大时，切削力增大，塑性变形程度相应增大，故硬化程度增大；但进给量太小时，由于刀具的刃口圆角在加工表面单位长度上的挤压次数增多，冷作硬化也会增加。

③ 改善被加工材料的性质。

被加工材料的硬度越小、塑性越大，切削加工后冷作硬化越大。

(2) 产生残余应力的因素及改善措施。

在没有外力作用下零件上存留的应力称为残余应力。残余应力在加工时导致表面层金属产生冷塑性变形或热塑性变形，因此残余应力分为残余压应力和残余拉应力两种。残余拉应力将对零件的使用性能产生不利影响，而适当的残余压应力可以提高零件的疲劳强度，因此常常在加工时有意使工件产生一定的残余压应力。产生残余应力的因素主要是表面层局部冷态塑性变形、局部热态塑性变形、局部金相组织的变化等几方面综合影响的结果。

改善表面残余应力状态的措施有以下几方面。

① 采用精密加工工艺。

精密加工工艺包括精密切削加工（金刚镗、高速精车、宽刃精刨等）和低粗糙度值高精度磨削。精密切削加工是依靠精度高、刚性好的机床和精细刃磨刀具，用很高或极低的切削速度、很小的背吃刀量在工件表面切去极薄一层金属的过程。由于切削过程残留面积小，又最大限度地排除了切削力、切削热和振动等不利影响，因此能有效地去除上道工序留下的表面变质层，加工后表面基本上不带有残余拉应力。低粗糙度值高精度磨削同样要求有很高的精度和刚性，其磨削过程是用经精细修整的砂轮，使每个磨粒上产生多个等高的微刃，以很小的背吃刀量，在适当的磨削压力下，从工件表面切下很微细的切屑。加上微刃呈微钝状态时的滑移、挤压、抚平作用和多次无进给光磨阶段的摩擦抛光作用，从而获得很高的加工精度和物理力学性能良好的低粗糙度值表面。

② 采用光整加工工艺。

光整加工工艺是用粒度很细的磨料对工件表面进行微量切削和挤压擦光的过程。随着加工的进行，工件加工表面各点都能得到基本相同的切削，使误差逐步均化而减小，从而获得极小的表面粗糙度值。由于光整加工时磨具与工件间能相对浮动，与工件定位基准间没有确定的位置，因此一般不能修正加工表面的位置误差。常用的光整加工方法有研磨、珩磨、超精加工及轮式超精磨等。

③ 采用表面强化工艺。

表面强化工艺是通过对工件表面的冷挤压使之发生冷态塑性变形，从而提高其表面硬度和强度，并形成表面残余压应力的加工工艺。表面强化工艺并不切除余量，仅使表面产生

塑性变形，因此修正工件尺寸误差和形状误差的能力很小，更不能修正位置误差。常用的表面强化工艺有喷丸和滚压。

除上述三种工艺外，采用高频淬火、氮化、渗碳、渗氮等表面热处理工艺也可使表面形成残余压应力。也可采用振动时效等人工时效方法来消除表面层的残余应力。

(3) 影响表面层金相组织变化的因素及改善措施。

金属材料只有当其温度达到相变温度以上时才会发生金相组织的变化，一般的切削加工切削热大部分被切屑带走，加工温度不高，故不会引起金相组织变化。而磨削时砂轮对金属切削、摩擦要消耗大量能量，每切除相同体积金属的能耗比车削平均高30倍。

磨削的能量几乎全部转化为热能。由于磨削层很薄，带走的热能少，绝大部分的热量传入工件，造成工件温度升高，很容易超过金属材料的相变温度，并伴随产生残余应力甚至裂纹。这种现象也叫磨削烧伤。影响表面层金相组织变化的因素取决于热源强度和作用时间。

减轻磨削热对加工的影响可从两个方面着手：一方面是减少磨削热的产生，另一方面是尽量使已产生的热少传入工件表面层。因此必须合理选择砂轮，正确选用磨削用量，改善润滑冷却条件。

1.4 数控加工工艺分析

1.4.1 选择适合数控加工的零件

数控机床在制造业的普及率逐年提高，但不是所有的零件都适于在数控机床上加工。根据数控加工的特点和国内外大量应用实践经验，一般可按适应程度将零件分为以下三类。

1. 最适应类

- (1) 形状复杂，加工精度要求高，通用机床无法加工或很难保证加工质量的零件；
- (2) 具有复杂曲线或曲面轮廓的零件；
- (3) 具有难测量、难控制进给、难控制尺寸型腔的壳体或盒型零件；
- (4) 必须在一次装夹中完成铣、镗、铰、绞或攻丝等多道工序的零件。

对于此类零件，首要考虑的是能否加工出来，只要有可能，应把采用数控加工作为首选方案，而不要过多地考虑生产率与成本问题。

2. 较适应类

- (1) 零件价值较高，在通用机床上加工时容易受人为因素（如工人技术水平高低、情绪波动等）干扰而影响加工质量，从而造成较大经济损失的零件；
- (2) 在通用机床上加工时必须制造复杂专用工装的零件；
- (3) 需要多次更改设计后才能定型的零件；
- (4) 在通用机床上加工需要做长时间调整的零件；
- (5) 用通用机床加工时，生产率很低或工人体力劳动强度很大的零件。

此类零件在分析其可加工性的基础上，还要综合考虑生产效率和经济效益，一般情况下可把它们作为数控加工的主要选择对象。

3. 不适应类

- (1) 生产批量大的零件（不排除其中个别工序采用数控加工）；
- (2) 装夹困难或完全靠找正定位来保证加工精度的零件；
- (3) 加工余量极不稳定，而且数控机床上无在线检测系统可自动调整零件坐标位置的零件；
- (4) 必须用特定的工艺装备协调加工的零件。

这类零件采用数控加工后，在生产率和经济性方面一般无明显改善，甚至有可能得不偿失，一般不应该把此类零件作为数控加工的选择对象。另外，数控加工零件的选择，还应该结合本单位拥有的数控机床的具体情况来选择加工对象。

1.4.2 确定数控加工的内容

在选择并决定某个零件进行数控加工后，并不是说零件所有的加工内容都采用数控加工，数控加工可能只是零件加工工序中的一部分。因此，有必要对零件图样进行仔细分析，选择那些最适合、最需要进行数控加工的内容和工序。同时，还应结合本单位的实际情况，立足于解决难题、攻克关键、提高生产效率和充分发挥数控加工的优势，一般可按下列原则选择数控加工内容。

- (1) 通用机床无法加工的内容应作为优先选择的内容。
- (2) 通用机床难加工，质量也难以保证的内容应作为重点选择的内容。
- (3) 通用机床加工效率低、工人手工操作劳动强度大的内容，可在数控机床尚存富余能力的基础上进行选择。

通常情况下，上述加工内容采用数控加工后，产品的质量、生产率与综合经济效益等指标都会得到明显的提高。相比之下，下列内容不宜采用数控加工：

- (1) 需要在机床上进行较长时间调整的加工内容，例如以毛坯的粗基准定位来加工第一个精基准的工序。
- (2) 数控编程取数困难、易于和检验依据发生矛盾的型面、轮廓。
- (3) 不能在一次安装中完成加工的其他零星加工表面，采用数控加工又很麻烦，可采用通用机床补充加工。
- (4) 加工余量大而又不均匀的粗加工。

此外，选择数控加工的内容时，还应该考虑生产批量、生产周期、生产成本和工序间周转情况等因素，杜绝把数控机床当作普通机床来使用。

1.4.3 加工零件的工艺性分析

选择并决定数控加工零件及其加工内容后，应对零件的数控加工工艺性进行全面、认真、仔细的分析。主要内容包括产品的零件图样分析、结构工艺性分析和零件安装方式的选择等内容。

1. 零件图样分析

首先应熟悉零件在产品中的作用、位置、装配关系和工作条件，搞清楚各项技术要求对零

件装配质量和性能的影响,找出主要的和关键的技术要求,然后对零件图样进行分析。

(1) 尺寸标注方法分析。零件图上尺寸标注方法应适应数控加工的特点,如图1-2(a)所示,在数控加工零件图上,应以同一基准标注尺寸或直接给出坐标尺寸。这种标注方法既便于编程,又有利于设计基准、工艺基准、测量基准和编程原点的统一。由于零件设计人员一般在尺寸标注中较多地考虑装配等使用方面特性,而不得不采用如图1-2(b)所示的局部分散的标注方法,这样就给工序安排和数控加工带来诸多不便。由于数控加工精度和重复定位精度都很高,不会因产生较大的累积误差而破坏零件的使用特性,因此,可将局部的分散标注法改为同一基准标注或直接给出坐标尺寸的标注法。

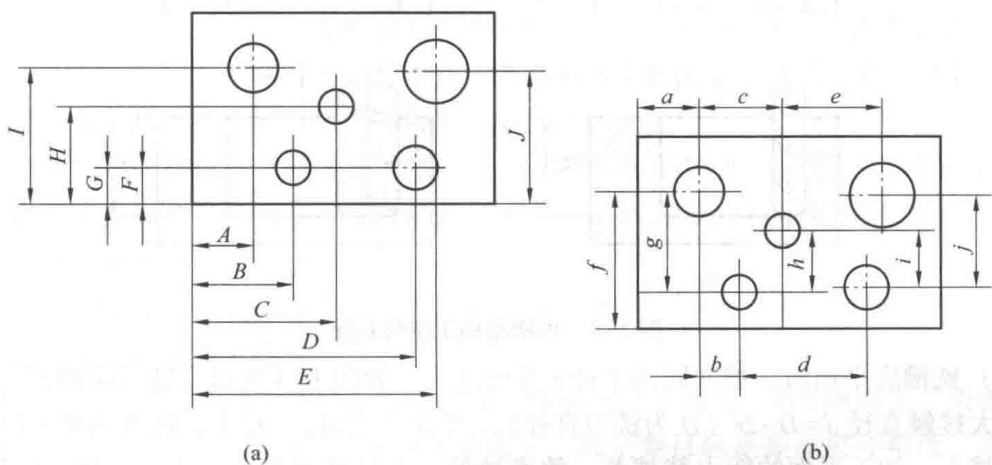


图1-2 零件尺寸标注分析

(2) 零件图的完整性与正确性分析。构成零件轮廓的几何元素(点、线、面)的条件(如相切、相交、垂直和平行等),是数控编程的重要依据。手工编程时,要依据这些条件计算每一个节点的坐标;自动编程时,则要根据这些条件才能对构成零件的所有几何元素进行定义,无论哪一条件不明确,编程都无法进行。因此,在分析零件图样时,务必要分析几何元素的给定条件是否充分,发现问题及时与设计人员协商解决。

(3) 零件技术要求分析。零件的技术要求主要是指尺寸精度、形状精度、位置精度、表面粗糙度及热处理等。这些要求在保证零件使用性能的前提下,应经济合理。过高的精度和表面粗糙度要求会使工艺过程复杂、加工困难、成本提高。

(4) 零件材料分析。在满足零件功能的前提下,应选用价廉、切削性能好的材料。而且,材料选择应立足国内,不要轻易选用贵重或紧缺的材料。

2. 零件的结构工艺性分析

零件的结构工艺性是指所设计的零件在满足使用要求的前提下制造的可行性和经济性。良好的结构工艺性,可以使零件加工容易,节省工时和材料。而较差的零件结构工艺性,会使加工困难,浪费工时和材料,有时甚至无法加工。因此,零件各加工部位的结构工艺性应符合数控加工的特点。

(1) 零件的内腔和外形最好采用统一的几何类型和尺寸,这样可以减少刀具规格和换刀次数,使编程方便,提高生产效率。

(2) 内槽圆角的大小决定着刀具直径的大小,所以内槽圆角半径不应太小。对于图